

Межгодовой тренд чувствительности камер комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 по результатам полётной калибровки в 2015–2020 гг.

Б. С. Жуков, Т. В. Кондратьева, И. В. Полянский

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru*

Ежегодно по снежным полям Антарктиды проводится абсолютная радиометрическая калибровка камер, входящих в комплекс многозональной спутниковой съёмки (КМСС) на космических аппаратах серии «Метеор-М». В настоящей работе анализируется межгодовой тренд радиометрической чувствительности камер МСУ-201, МСУ-202 и МСУ-250, входящих в состав КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2, по которым накоплены результаты радиометрической калибровки за наиболее длительный период: с 2015 по 2020 г. По результатам калибровки хорошо виден тренд на уменьшение чувствительности камер, который за пять лет составил 5–27 % в зависимости от камеры и канала. Наибольшая деградация чувствительности происходила в смотрящих в надир каналах 2 камер (спектральные зоны 0,63–0,68 мкм для камер МСУ-201 и МСУ-202 и 0,37–0,45 мкм для камеры МСУ-250), наименьшая — в смотрящих вперёд каналах 1 камер МСУ-201 и МСУ-202 (0,785–0,87 мкм) и в смотрящем назад канале 3 камеры МСУ-250 (0,58–0,69 мкм). Полученные результаты анализа межгодового тренда чувствительности камер КМСС-М подтверждают необходимость регулярной полётной абсолютной радиометрической калибровки космических съёмочных систем для поддержания радиометрического качества получаемых данных.

Ключевые слова: комплекс многозональной спутниковой съёмки, КМСС-М, КА «Метеор-М» № 2, полётная радиометрическая калибровка, чувствительность камер

Одобрена к печати: 01.12.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60

На космических аппаратах (КА) серии «Метеор-М» начиная с 2009 г. устанавливаются постоянно совершенствующиеся модификации комплекса многозональной космической съёмки (КМСС), предназначенного для решения природно-ресурсных и метеорологических задач со средним пространственным разрешением (Аванесов и др., 2013). В настоящее время на орбите функционируют КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2, запущенном в 2014 г., и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 (2019) (Полянский и др., 2019).

Ежегодно по снежным полям Антарктиды проводится абсолютная радиометрическая калибровка всех действующих КМСС (Жуков и др., 2014). В настоящей работе анализируется межгодовой тренд радиометрической чувствительности камер, входящих в состав КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2, по которым накоплены результаты радиометрической калибровки за наиболее длительный период: с 2015 по 2020 г.

В состав КМСС-М входят две идентичные камеры МСУ-100М с фокусным расстоянием 100 мм, условно обозначаемые МСУ-201 и МСУ-202, и одна камера МСУ-50М с фокусным расстоянием 50 мм, условно обозначаемая МСУ-250, характеристики которых приведены в *табл. 1*. Камеры МСУ-201 и МСУ-202 установлены на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол $\pm 14^\circ$ в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты. В результате обеспечивается формирование суммарной полосы обзора камер МСУ-201 и МСУ-202, примерно равной ширине полосы обзора МСУ-250. Оптическая схема камер включает объектив, в фокальной плоскости которого расположены три линейных ПЗС-фотоприёмника (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device) с установленными перед ними интерференционными фильтрами, обеспечивающими формирование требуемых спектральных зон (*рис. 1*, см. с. 54). Спектральные зоны МСУ-201 и МСУ-202 оптимизированы для исследования

поверхности суши, а МСУ-50 — для исследования акваторий. Каналы 1 и 3 камер, в которых используются крайние ПЗС-линейки, смотрят соответственно вперёд и назад под углом $8,67^\circ$ для МСУ-201 и МСУ-202 и под углом $16,95^\circ$ для МСУ-250; каналы 2 камер, в которых используются центральные ПЗС-линейки, смотрят в надир.

Таблица 1. Характеристики камер КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2

Параметры	Камера	
	МСУ-201, МСУ-202	МСУ-250
Фотоприёмники	3 линейных ПЗС	
Число активных элементов в строке	7926	
Захват, км	960 (двумя камерами)	940
Проекция элемента на поверхность, м	60	120
Спектральные каналы, мкм	1-й: 0,755–0,87 2-й: 0,63–0,68 3-й: 0,535–0,58	1-й: 0,45–0,51 2-й: 0,37–0,45 3-й: 0,58–0,69
Частота строк, Гц	156,25	
Разрядность АЦП/изображения, бит	16/8	
Масса, кг	2,9	2,3
Максимальное энергопотребление, Вт	6,8	6,8

АЦП — аналого-цифровой преобразователь.

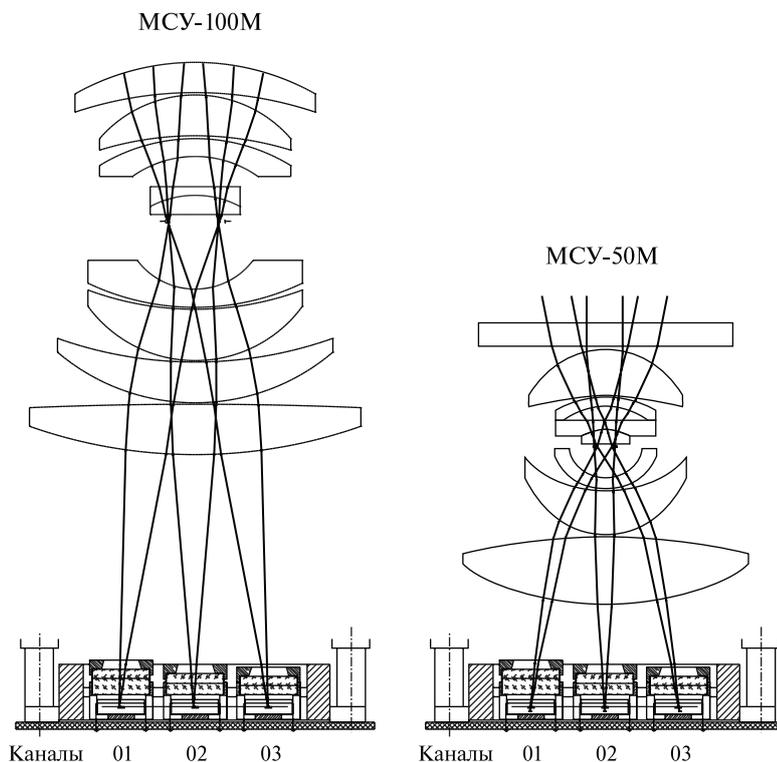


Рис. 1. Оптическая схема камер МСУ-100М и МСУ-50М

Абсолютная калибровка комплексов КМСС на всех действующих КА проводится в январе–феврале каждого года в районе с координатами $70-80^\circ$ ю. ш., $90-130^\circ$ в. д., расположенном на Антарктическом плато на высоте более 3 км. Этот район обладает высокой однородностью снежного покрова и обычно на больших площадях свободен от облаков. Отсутствие

существенных источников загрязнений и процессов таяния снега делают отражательные характеристики снега в указанном районе очень стабильными. Вследствие малых наклонов поверхности (менее $0,4^\circ$ на базе 10 км) их влиянием на индикатрису рассеяния снега можно пренебречь. При углах наблюдения КМСС менее 40° снежные дюны (заструги) оказывают слабое влияние на индикатрису рассеяния. Кроме того, из-за отсутствия доминирующего направления ветра в указанных районах ориентация этих дюн также не имеет доминирующего направления, и их эффект нивелируется при пространственном усреднении. Другое преимущество указанного района — высокая прозрачность атмосферы: горизонтальная дальность видимости здесь составляет ~ 100 км, содержание водяного пара в атмосфере — $0,02-0,12$ см в зависимости от сезона. В центре этого района находится тестовый участок Dome-C (75° ю. ш., 123° в. д.), который широко используется для калибровки спутниковых съёмочных систем (http://calval.cr.usgs.gov/rst-resources/sites_catalog).

В результате получены приведённые в *табл. 3* калибровочные функции, которые справедливы для условий съёмки КМСС-М указанного района Антарктиды в январе–феврале: углы θ_S в диапазоне $15-25^\circ$, углы θ в диапазоне $0-40^\circ$. Точность калибровочных функций оценивается в $6-7\%$ с учётом точности бортовой калибровки MODIS $\sim 5\%$, которая поддерживается в полёте с помощью его внутренней калибровки, калибровки по Луне и наземным тестовым участкам (Wu et al., 2013).

Таблица 2. Регрессионные соотношения для пересчёта значений КСЯ между спектральными зонами камер КМСС-М и MODIS/Terra (mod*i* — КСЯ в зоне *i* MODIS/Terra)

Канал	Регрессионное соотношение	СКО
Камера МСУ-201:		
канал 1 (0,755–0,87 мкм)	$0,658\text{mod}2 + 0,313\text{mod}17$	0,0089
канал 2 (0,63–0,68 мкм)	$1,015\text{mod}1$	0,0019
канал 3 (0,535–0,58 мкм)	$0,988\text{mod}4$	0,0021
Камера МСУ-202:		
канал 1 (0,755–0,87 мкм)	$0,680\text{mod}2 + 0,285\text{mod}17$	0,0097
канал 2 (0,63–0,68 мкм)	$1,017\text{mod}1$	0,0020
канал 3 (0,535–0,58 мкм)	$0,990\text{mod}4$	0,0018
Камера МСУ-250:		
канал 1 (0,45–0,51 мкм)	$1,010\text{mod}10$	0,0045
канал 2 (0,37–0,45 мкм)	$1,003\text{mod}9$	0,0030
канал 3 (0,58–0,69 мкм)	$0,852\text{mod}4 + 0,132\text{mod}1$	0,0033

Таблица 3. Зависимость КСЯ снежных полей Антарктиды от зенитного угла Солнца θ_S и угла наблюдения θ для спектральных каналов камер КМСС-М (по данным кросс-калибровки с MODIS, 2015 г.)

Канал	Индикатриса рассеяния
МСУ-201:	
канал 1 (0,78–0,90 мкм)	$\rho = 0,9381 - 0,002324\theta_S + 0,000498\theta$
канал 2 (0,63–0,68 мкм)	$\rho = 1,1492 - 0,004869\theta_S + 0,000336\theta$
канал 3 (0,535–0,575 мкм)	$\rho = 1,1842 - 0,005523\theta_S + 0,000176\theta$
МСУ-202:	
канал 1 (0,78–0,90 мкм)	$\rho = 0,9350 - 0,002311\theta_S + 0,000494\theta$
канал 2 (0,63–0,68 мкм)	$\rho = 1,1512 - 0,004877\theta_S + 0,000337\theta$
канал 3 (0,535–0,575 мкм)	$\rho = 1,1866 - 0,005534\theta_S + 0,000177\theta$
Камера МСУ-250:	
канал 1 (0,45–0,51 мкм)	$\rho = 0,9451 - 0,001213\theta_S + 0,00134\theta$
канал 2 (0,37–0,45 мкм)	$\rho = 1,0386 - 0,002075\theta_S + 0,00113\theta$
канал 3 (0,58–0,69 мкм)	$\rho = 0,9420 - 0,002392\theta_S + 0,00076\theta$

Угловое распределение коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), т.е. индикатриса рассеяния снежного покрова, в спектральных зонах камер КМСС было прокалибровано

в 2015 г. в указанном районе по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с использованием методики, описанной в работе (Жуков и др., 2014), которая включает:

- построение регрессионных соотношений, связывающих значения КСЯ в спектральных зонах камер КМСС-М и MODIS на основе моделирования спектров КСЯ большого числа спектров природных объектов в различных условиях наблюдения (*табл. 2*);
- моделирование изображений в спектральных зонах камер КМСС-М по изображениям MODIS и калибровка по ним индикатрисы рассеяния — зависимости КСЯ от зенитных углов Солнца θ_s и наблюдения θ , которая используется как калибровочная функция для калибровки реальных изображений КМСС-М.

Учитывая стабильность характеристик снежного покрова и атмосферы в данном районе, калибровочные функции, приведённые в *табл. 3*, использовались для калибровки камер КМСС-М и в последующие годы. Корректность их дальнейшего использования подтверждается также проводящимся ежегодно независимым сопоставлением КСЯ различных природных объектов (почв, растительности, воды, а также антарктического снега) на более чем 100 полигонах по данным КМСС и MODIS, которое показывает соответствие их абсолютной калибровки в пределах нескольких процентов (Кондратьева и др., 2018). В этом случае измерения проводятся по данным КМСС-М, прошедшим процедуру радиометрической коррекции по результатам калибровки по Антарктиде, и в отличие от последней усредняются по площади полигона.

В ходе калибровки по снежному покрову Антарктиды калибруется коэффициент чувствительности каждого элементарного детектора ПЗС-линеек. При этом темновой сигнал элементарных детекторов определяется по сигналу «темновых» пикселей, расположенных в начале ПЗС-линеек каждого канала, и по калиброванной на земле неоднородности темнового сигнала.

Для калибровки выбираются однородные участки, свободные от облаков. Поскольку КСЯ снега и облаков близки, их бывает трудно дифференцировать в данных КМСС-М. Тем не менее облака имеют приблизительно на 10 % меньшие значения КСЯ и могут повлиять на точность калибровки. Поэтому для исключения облаков параллельно с изображениями КМСС анализируются ближайшие по времени изображения MODIS в канале 6 (1,640 мкм), где снег значительно темнее облаков (*рис. 2*).

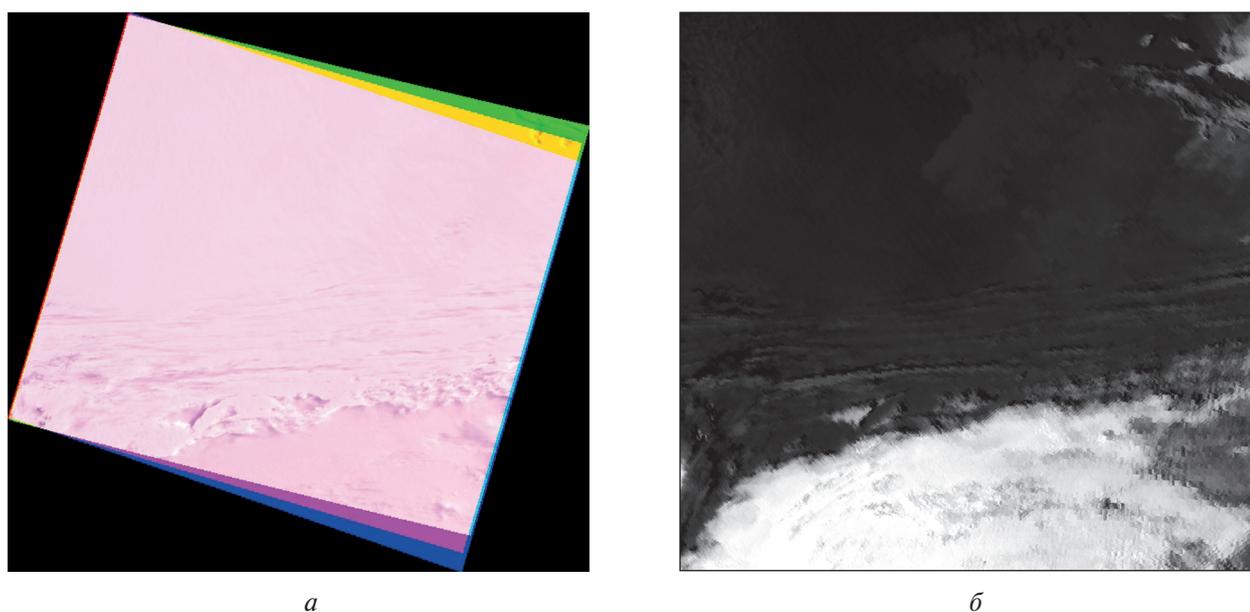


Рис. 2. Снимки снежного покрова Антарктиды с облачностью в нижней части: *а* — трёхканальный цветосинтезированный снимок КМСС-М/МСУ-201; *б* — снимок MODIS в канале 6

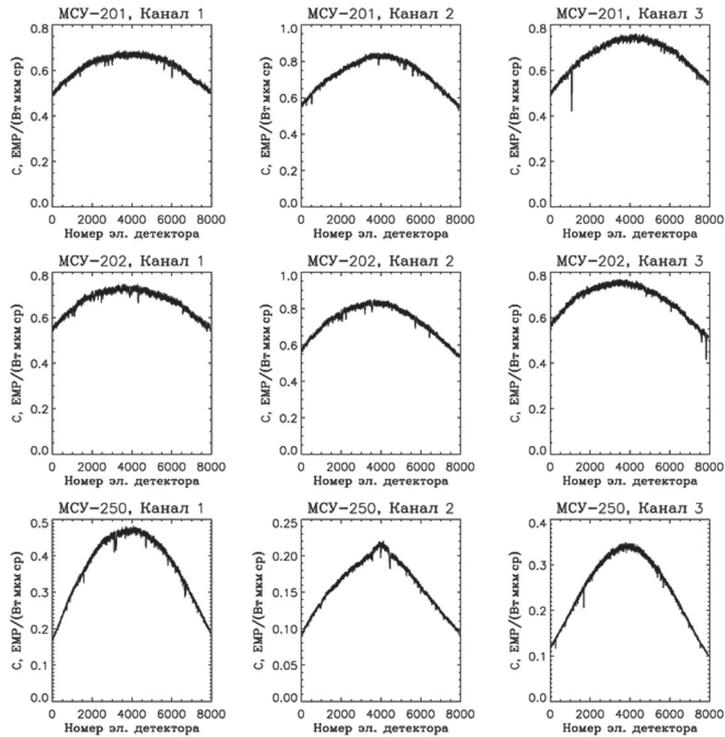


Рис. 3. Зависимость коэффициента чувствительности камер КМСС-М от номера элементарного детектора ПЗС-линейки по результатам калибровки по Антарктиде в январе – феврале 2020 г.

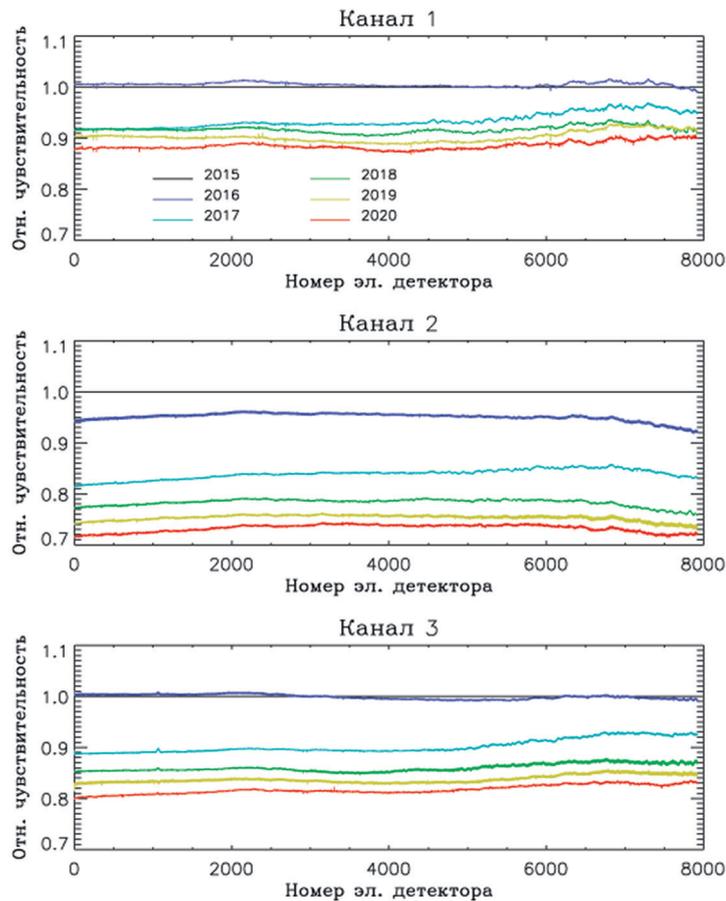


Рис. 4. Изменение относительной чувствительности камеры MSU-201 в зависимости от номера элементарного детектора ПЗС-линейки. Цифры у кривых — год калибровки

Для калибровки коэффициента чувствительности измерения КСЯ для каждого элементарного детектора ПЗС-линеек сопоставляются с калибровочной функцией, и по их отношению определяется поправочный коэффициент, который усредняется за весь период калибровки. Число измерений (т. е. число использованных строк однородных фрагментов изображений) для каждого элементарного детектора обычно составляет от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч. Полученные поправочные коэффициенты используются для ежегодной коррекции коэффициентов чувствительности элементарных детекторов в файлах радиометрической калибровки камер КМСС-М.

Распределение коэффициентов чувствительности вдоль ПЗС-линеек, полученное при последней калибровке камер в 2020 г., приведено на *рис. 3* (см. с. 57).

Калибровки, проведённые в 2015–2020 гг., позволяют судить о характере изменения чувствительности камер. Для примера на *рис. 4* (см. с. 57) приведено межгодовое изменение относительной чувствительности по длине ПЗС-линейки в каналах камеры МСУ-201. Относительная чувствительность определяется как отношение коэффициента чувствительности элементарного детектора в данный год калибровки к коэффициенту чувствительности в 2015 г., когда была проведена первая калибровка по Антарктиде. Очевиден тренд на уменьшение чувствительности по всей длине ПЗС-линейки.

Рисунок 5 иллюстрирует изменение чувствительности каналов всех камер КМСС-М, усреднённое по длине ПЗС-линейки, за шесть лет наблюдений с 2015 по 2020 г. На фоне выбросов чувствительности, обусловленных, вероятно, ошибками калибровки в 2016 г., хорошо виден тренд на уменьшение чувствительности, который за данный период составил 5–27 % в зависимости от камеры и канала.

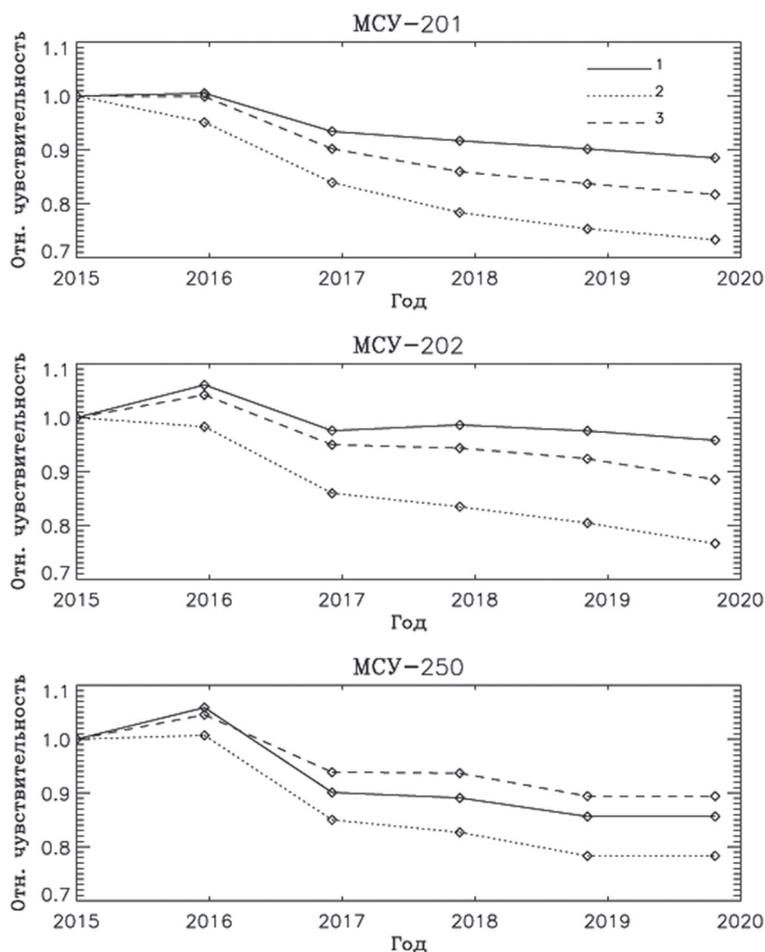


Рис. 5. Изменение среднеканальной относительной чувствительности камер КМСС-М по результатам калибровки в период 2015–2020 гг. Цифры у кривых — номера каналов

Стабильность отражательных характеристик калибровочного района Антарктиды и подтвержденная независимо стабильность кросс-калибровки КМСС-М и MODIS указывают на то, что обнаруженный тренд чувствительности является реальным эффектом. Можно отметить, что наибольшая деградация чувствительности происходила в смотрящих в надир каналах 2 камер МСУ-201 и МСУ-202 (спектральные зоны 0,63–0,68 мкм) и камеры МСУ-250 (0,37–0,45 мкм), наименьшая — в смотрящих вперёд каналах 1 камер МСУ-201 и МСУ-202 (0,755–0,87 мкм) и в смотрящем назад канале 3 камеры МСУ-250 (0,58–0,69 мкм). Таким образом, величина деградации чувствительности коррелирует не со спектральной зоной, а с углом наблюдения канала, который определяется положением его ПЗС-линейки относительно оптической оси камер.

Возможным объяснением этого эффекта может быть контаминация (пожелтение) стёкол объектива под действием радиации, приводящая не только к изменению функции спектральной чувствительности каналов, но и к уменьшению прозрачности объектива. В этом случае влияние уменьшения прозрачности должно быть сильнее как раз в смотрящих в надир каналах камер, в которых ПЗС-линейки расположены вблизи оптической оси, где толщина линз максимальна (см. *рис. 1*).

Полученные результаты анализа межгодового тренда чувствительности камер КМСС-М подтверждают необходимость регулярной полётной абсолютной радиометрической калибровки космических съёмочных систем для поддержания радиометрического качества получаемых данных.

Литература

1. Аванесов Г. А., Полянский И. В., Жуков Б. С., Никитин А. В., Форш А. А. Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
2. Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Полянский И. В., Пермитина Л. И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» № 1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123–137.
3. Кондратьева Т. В., Жуков Б. С., Пермитина Л. И., Полянский И. В. Сопоставление радиометрических данных КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 с данными MODIS КА Terra и OLI Landsat-8 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 19–28.
4. Полянский И. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Прохорова С. А., Сметанин П. С. Комплекс многозональной спутниковой съемки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92.
5. Wu A. S., Xiong X. X., Doelling D. R., Morstad D., Angal A., Bhatt R. Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2013. V. 51. No. 7. P. 4330–4338.

Interannual sensitivity trend of the cameras of the multispectral satellite imaging system KMSS-M on Meteor-M No. 2 spacecraft based on the in-flight calibration in 2015–2020

B. S. Zhukov, T. V. Kondratieva, I. V. Polyanskiy

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru

Absolute radiometric calibration of the multispectral satellite imaging system KMSS on the Meteor-M series spacecraft is performed annually over the snow fields of Antarctica. This paper analyzes the interannual sensitivity trend of the MSU-201, MSU-202 and MSU-250 cameras, which are part of the KMSS-M on the Meteor-M No. 2 satellite, based on their calibration in 2015–2020. According to the calibration results, a trend towards a decrease in the cameras sensitivity is clearly seen, which amounted to 5–27 % over 5 years of observation, depending on the camera and channel. The greatest sensitivity degradation took place in the nadir-looking channel 1 of the cameras (spectral zones 0.63–0.68 μm for MSU-201 and MSU-202 and 0.37–0.45 μm for MSU-250), the least — in the forward-looking channel 1 of MSU-201 and MSU-202 (0.755–0.87 μm) and in the backward-looking channel 3 of MSU-250 (0.58–0.69 μm). The results confirm the need for a regular in-flight absolute radiometric calibration of the satellite imaging systems to maintain the radiometric quality of their data.

Keywords: multispectral satellite imaging system, KMSS-M, Meteor-M No. 2, in-flight radiometric calibration, camera sensitivity

Accepted: 01.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-53-60

References

1. Avanesov G. A., Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Nikitin A. V., Forsh A. A., Kompleks mnogozonol'noi sputnikovoi s"emki na bortu KA "Meteor-M" No. 1: tri goda na orbite (Multispectral satellite imaging system aboard the Meteor-M No. 1 spacecraft: three years in orbit), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 2, pp. 74–83.
2. Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Polyanskiy I. V., Permitina L. I., Poletnaya radiometricheskaya krosskalibrovka kompleksa mnogozonol'noi sputnikovoi s"emki na KA "Meteor-M" No. 1 po spektroradiometru MODIS na KA Terra (In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System on-board Meteor-M No. 1 relative spectroradiometer MODIS on-board Terra), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 123–137.
3. Kondratieva T. V., Zhukov B. S., Permitina L. I., Polyanskiy I. V., Sopostavlenie radiometricheskikh dannykh KMSS-M KA "Meteor-M" No. 2 s dannymi MODIS KA "Terra" i OLI Landsat-8 (Reflectance data comparison of the multispectral satellite imaging system KMSS-M on-board Meteor-M No. 2, MODIS on Terra and OLI on Landsat-8), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 19–28.
4. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Prokhorova S. A., Smetanin P. S., Kompleks mnogozonol'noi sputnikovoi s"emki srednego razresheniya dlya gidrometeorologicheskikh kosmicheskikh apparatov (Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hygrometeorological spacecraft), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 83–92.
5. Wu A. S., Xiong X. X., Doelling D. R., Morstad D., Angal A., Bhatt R., Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 7, pp. 4330–4338.